**доц. Миндолин С.Ф.**

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1-5: СОУДАРЕНИЕ ШАРОВ.**

**Студент группы\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

Допуск **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_** Выполнение **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**Защита **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**Цель работы:** Проверка закона сохранения импульса. Проверка закона сохранения механической энергии для упругих столкновений. Экспериментальное определение импульса шаров до и после столкновения, расчёт коэффициента восстановления кинетической энергии, определение средней силы соударения двух шаров, скорости шаров при соударении.

**Приборы и принадлежности:** прибор для исследования столкновения шаров FPM-08, весы, шары, изготовленные из разных материалов.

###### Описание экспериментальной установки. Механическая конструкция прибора

Общий вид прибора для исследования столкновения шаров FPM-08 представлен на рис.1. Основание 1 оснащено регулируемыми ножками (2), которые позволяют устанавливать горизонтальное положение основания прибора. В основании закреплена колонна 3, к которой перекреплены нижний 4 и верхний 5 кронштейны. На верхнем кронштейне крепится стержень 6 и винт 7, служащие для установки расстояния между шарами. На стержнях 6 помещены передвигаемые держатели 8 с втулками 9, фиксированные при помощи болтов 10 и приспособленные к прикреплению подвесов 11. Через подвесы 11 проходят провода 12, подводящие напряжение к подвесам 13, а через них к шарам 14. После ослабления винтов 10 и 11 можно добиться центрального соударения шаров.



Рис. 1. Экспериментальная установка для изучения соударения шаров

9

На нижнем кронштейне закреплены угольники со шкалами 15,16, а на специальных направляющих - электромагнит 17. После отвинчивания болтов 18,19 электромагнит можно передвигать вдоль правой шкалы и фиксировать высоту его установки, что позволяет изменять начальный угол первого шара. К основанию прибора прикреплён секундомер FRM-16 21,передающий через разъем 22 напряжение к шарам и электромагниту.

На лицевой панели секундомера FRM-16 находятся следующие манипуляционные элементы:

1. W1 (Сеть)- выключатель сети. Нажатие этой клавиши вызывает включение питающего напряжения;
2. W2 (Сброс) – сброс измерителя. Нажатие этой клавиши вызывает сбрасывание схем секундомера FRM-16.
3. W3 (Пуск) –управление электромагнитом. Нажатие этой клавиши вызывает освобождение электромагнита и генерирование в схеме секундомера импульса как разрешение на измерения.

Теоретические сведения

В механике **ударом** называют явление изменение скоростей тел на конечные значения за очень короткий промежуток времени, происходящие при их столкновении. Например, столкновение шаров, удар молота о наковальню, попадание пули в мишень и т. д. В процессе удара возникают кратковременные ударные силы взаимодействия между сталкивающимися телами, причем эти силы во много раз превосходят все внешние силы, действующие на тела.



Рис. 2

Общая нормаль к поверхности соударяющихся шаров называется **линией удара**. Удар называется **прямым**, если перед ударом скорости центров масс соударяющихся тел параллельны линии удара. Удар называется **центральным,** если центры масс соударяющихся тел лежат на линии удара. Прямой центральный удар называется **абсолютно неупругим**, если после удара тела движутся как одно целое.При неупругом ударе происходят различного рода процессы в соударяющихся телах (пластические деформации, трение и др.), в результате которых механическая энергия системы преобразуется в ее внутреннюю энергию. **Абсолютно упругим ударом** называется такой удар, при котором механическая энергия соударяющихся тел не преобразуется в другие виды энергии. Идеально упругих ударов в природе не существует, так как всегда часть энергии затрачивается на необратимую деформацию тел и увеличение их внутренней энергии. Однако для некоторых тел, например стальных шаров, потерями механической энергии можно пренебречь. Заметим, что даже и в этом случае часть механической энергии соударяющихся шаров превращается в механическую энергию звуковой волны, которую мы слышим во время удара.

Рассмотрим соударение шаров на данной установке. Изобразим все внешние силы, действующие на шары во время удара: силы тяжести шаров;  силы реакции нитей. Силы взаимного отталкивания, возникающие во время столкновения, являются внутренними, поэтому мы их не изображаем. Внутренние силы не изменяют импульса рассматриваемой системы (см. приложение). Запишем закон изменения импульса системы за время столкновения :

 (1)

Пусть первый шар до столкновения имеет скорость , в второй до столкновения покоился. В этом случае . Не скомпенсированной остается сила реакции нити , действующей на первый шарик перед ударом, т.к. первый шарик в этот момент имеет центростремительное ускорение. В этом случае мы имеем не замкнутую систему. Предполагая, что за время столкновения вектор суммы внешних сил меняется не значительно, спроектировав данное равенство на ось ОХ, получим:

 (2)

Очевидно, что , поэтому проекция изменения импульса системы на ось ОХ равно нулю, т.е. проекция импульса системы до удара равна проекции импульса системы после удара. Это утверждение справедливо как для упругого, так и для неупругого удара. Это утверждение подлежит проверке в данной работе.

Запишем закон сохранения проекции импульса на ось ОХ для центрального неупругого и упругого ударов:



где  проекция импульса первого шара перед столкновением;  проекция импульса системы после центрального неупругого удара;  проекция импульса системы после центрального упругого удара.

Для определения скоростей шаров до и после ударов воспользуемся законом сохранения механической энергии. При движении первого шара до удара на него действуют две силы: сила тяжести  и сила натяжения нити . Сила тяжести является консервативной, а сила натяжения в данном случае не совершает работы, т.к. на любом бесконечно малом участке траектории она направлена перпендикулярно бесконечно малому перемещению. Поэтому во время полета механическая энергия первого шара сохраняется. Это же утверждение справедливо и для движения шаров после столкновения. Обозначим начальный угол отклонения первого шара через  и высоту – через .

Запишем закон сохранения механической энергии для первого шара: , где  – начальная механическая энергия шара;  – механическая энергия шара перед столкновением. Отсюда имеем следующее соотношение:. Из рисунка видно что:

, (3)

где  длина нити.

Равенство (3) позволяет выразить импульс и кинетическую энергию первого шара перед ударом:

,  (4)

Рассуждая аналогично для движения шаров после неупругого столкновения, можно записать следующие равенства для их энергий и импульсов:

, , (5)

где  угол отклонения второго шара после центрального неупругого удара.

Для шаров, испытавших упругое столкновение, соответственно имеем равенства:

,

. (6)

где  соответственно углы отклонения первого и второго шара после центрального упругого удара.

**Замечание:**  ***Проекция импульса первого удара после столкновения является положительной величиной в том случае, когда направление его скорости до и после удара совпадают, в противном случае проекция импульса является отрицательной величиной.***

Коэффициентом восстановления кинетической энергии называется величина, равная отношению кинетической энергии системы после удара к кинетической энергии системы до удара:

- для неупругого столкновения, (7)

- для упругого столкновения, (8)

Определение средней силы соударения двух шаров при упругом ударе

Рассмотрим упругий удар шаров. Если второй шар до соударения остаётся в покое, то на основании закона изменения проекции его импульса на ось ОХ можем записать следующее равенство:

,

где проекция вектора изменения импульса второго шара,  проекция его скорости до удара,  среднее значение проекции силы, действующий на второй шар со стороны первого в течении времени столкновения . Т.к. второй шар до удара покоился, то  и  , кроме того  (см. рис.2). Окончательно имеем равенство для силы взаимодействия шаров при ударе:

. (9)

# Подготовка прибора к работе

Перед началом выполнения работы необходимо проверить является удар шаров центральным, для этого нужно отклонить первый шар (меньшей массы) на некоторый угол и нажать клавишу W3 (Пуск). Плоскости траекторий движения шаров после столкновения должны совпадать с плоскостью движения первого шара до столкновения. Центра масс шаров в момент соударения должны находится на одной горизонтальной линии. Если этого не наблюдается, то необходимо выполнить следующие действия:

1. С помощью винтов 2 добиться вертикального положения колонны 3 (рис. 1).
2. Изменяя длину нити подвеса одного из шаров необходимо добиться того, что центры масс шаров находились на одной горизонтальной линии. При соприкосновении шаров нити должны быть вертикальны. Это достигается перемещением винтов 7 (см. рис. 1).
3. Необходимо добиться того, чтобы плоскости траекторий движения шаров после соударения совпадали с плоскостью траектории первого шара до столкновения. Это достигается с помощью винтов 8 и 10.
4. Отпустить гайки 20, угловые шкалы 15,16 установить таким образом, чтобы указатели углов в момент, когда шары занимают положение покоя, показывали на шкалах ноль. Затянуть гайки 20.

**Упражнение №1. Проверка закона сохранения импульса при неупругом центральном ударе. Определение коэффициента восстановления кинетической энергии.**

Для изучения неупругого удара берется стальной и пластилиновый шар, либо два стальных, но на одном в месте, где происходит удар, прикреплен кусочек пластилина.

**Таблица №1.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№ опыта** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **1** | 14.5 | 3.3 | 0.039 | 0.104 | 0.01874 | 0.01568 |  | 0.0045 | 0.00086 | 0.19 |
| **2** | 3 | 0.01426 | 0.00071 | 0.16 |
| **3** | 2.9 | 0.01378 | 0.00066 | 0.15 |
| **4** | 3.2 | 0.01521 | 0.00081 | 0.18 |
| **5** | 3.1 | 0.01473 | 0.00076 | 0.17 |

1. Получить у преподавателя начальное значение угла отклонения первого шара  и записать его в табл. №1.
2. Установить электромагнит так, чтобы угол отклонения первого шара (меньшей массы) соответствовал заданному значению .
3. Отклонить первый шар на заданный угол, нажать на клавишу <ПУСК> и произвести отсчет угла отклонения второго шара **.** Опыт повторить 5 раз. Полученные значения угла отклонения **** записать в табл. №1.
4. Взвесить массы шаров **** и ****, или у обслуживающего данную лабораторию технического персонала.
5. По формуле (4) найти импульс первого шара до столкновения и записать в табл. №1.
6. По формуле (5) найти 5 значений импульса системы шаров после столкновения и записать в табл. №1.
7. По формуле  найдите среднее значение импульса системы после столкновения.
8. По формуле  найти дисперсию среднего значения импульса системы шаров после столкновения. Найдите среднеквадратичное отклонение среднего значения  импульса системы после столкновения. Полученное значение  занесите в табл. №1.
9. По формуле (4) найдите начальное значение кинетической энергии первого шара до столкновения **,** и занесите его в табл. №1.
10. По формуле (5) найдите пять значений кинетической энергии системы шаров после столкновения **,** и занесите его в табл. №1.
11. По формуле (7) найдите коэффициент восстановления кинетической энергии **.**
12. Запишите интервал для импульса системы после столкновения в виде .

**Найдите отношение проекции импульса системы после неупругого удара к начальному значению проекции импульса до удара . По полученному значению отношения проекции импульсов до и после столкновения сделайте вывод о сохранении импульса системы во время столкновения.**

Вывод: в лабораторной работе мы по массам шаров и углам отклонения определили импульс системы до и после неупругого взаимодействия шаров, определили коэффициент восстановления кинетической энергии и по полученным данным проверили и подтвердили закон сохранения импульса при неупругом центральном ударе.

**Упражнение №2. Проверка закона сохранения импульса и механической энергии при упругом центральном ударе. Определение силы взаимодействия шаров при столкновении.**

Для изучения упругого удара берутся два стальных шара, шар меньшей массы считается первым.

**Таблица №2.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№ опыта** |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| **1** | 12.5 | 6 | 5.5 | 0.108 | 0.039 | 0.104 |  | 0.01123 |  |  |  |  | 0.25 |
| **2** | 5.7 | 5.3 | 0.110 | 0.01093 |  | 0.23 |
| **3** | 5.5 | 5 | 0.090 | 0.01015 |  | 0.27 |
| **4** | 6 | 5.6 | 0.114 | 0.01157 |  | 0.24 |
| **5** | 6.3 | 5.7 | 0.110 | 0.01153 |  | 0.25 |

1. Получить у преподавателя начальное значение угла отклонения первого шара  и записать его в табл. №2.
2. Установить электромагнит так, чтобы угол отклонения первого шара (меньшей массы) соответствовал заданному значению .
3. Отклонить первый шар на заданный угол, нажать на клавишу <ПУСК> и произвести отсчет углов отклонения первого шара **** ивторого шара **** и времени соударения шаров **.** Опыт повторить 5 раз. Полученные значения углов отклонения и времени соударениязаписать в табл. №2.
4. Взвесить массы шаров **** и ****, или у обслуживающего данную лабораторию технического персонала.
5. По формуле (4) найти импульс первого шара до столкновения и записать в табл. №2.
6. По формуле (6) найти 5 значений импульса системы шаров после столкновения и записать в табл. №2.
7. По формуле  найдите среднее значение импульса системы после столкновения.
8. По формуле  найти дисперсию среднего значения импульса системы шаров после столкновения. Найдите среднеквадратичное отклонение среднего значения  импульса системы после столкновения. Полученное значение  занесите в табл. №2.
9. По формуле (4) найдите начальное значение кинетической энергии первого шара до столкновения **,** и занесите его в табл. №2.
10. По формуле (6) найдите пять значений кинетической энергии системы шаров после столкновения **,** и занесите его в табл. №2.
11. По формуле  найдите среднее значение кинетической энергии системы после столкновения.
12. По формуле  найти дисперсию среднего значения кинетической энергии системы шаров после столкновения. Найдите среднеквадратичное отклонение среднего значения  кинетической энергии системы после столкновения. Полученное значение  занесите в табл. №2.
13. По формуле найдите коэффициент восстановления кинетической энергии **.**
14. По формуле (9) найдите среднее значение силы взаимодействия , и занесите в табл. №2.
15. Запишите интервал для импульса системы после столкновения в виде .
16. Запишите интервал для кинетической энергии системы после столкновения в виде .

# Найдите отношение проекции импульса системы после упругого удара к начальному значению проекции импульса до удара . По полученному значению отношения проекции импульсов до и после столкновения сделайте вывод о сохранении импульса системы во время столкновения.

**Найдите отношение кинетической энергии системы после упругого удара к значению кинетической энергии системы до удара . По полученному значению отношения кинетических энергий до и после столкновения сделайте вывод о сохранении механической энергии системы во время столкновения.**

**Сравните полученное значение величины силы взаимодействия  с силой тяжести шара большей массы. Сделайте вывод об интенсивности сил взаимного отталкивания, действующих во время удара.**

Вывод: в лабораторной работе мы по массам шаров и углам отклонения определили импульс системы до и после упругого взаимодействия шаров, определили значение силы взаимодействия шаров при упругом столкновении, сделали заключение об интенсивности сил взаимного отталкивания (интенсивность сил взаимного отталкивания напрямую зависит от силы тяжести данных шаров, и она тем больше, чем меньше разность сил тяжести шаров по модулю, с учетом погрешности измерения, потери части энергии при столкновении и выделении теплоты) и по полученным данным проверили и подтвердили закон сохранения импульса, закон сохранения механической энергии при упругом центральном ударе.

# КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. На примере двух частиц вывести закон изменения импульса этой системы. Сформулировать условия, при которых сохраняется импульс системы или его проекция. Что такое внешние и внутренние силы.
2. Дать понятие механической работы. Привести формулу для нахождения работы переменной силы по криволинейному участку траектории. Какие силы называются консервативными и неконсервативными. Дать понятие потенциальной энергии.
3. Дать понятие кинетической энергии материальной точки и твердого тела. Вывести теорему об изменении кинетической энергии.
4. На примере одной материальной точки вывести закон изменения ее полной механической энергии.
5. Что такое удар упругий и неупругий?
6. Дать понятие изолированной системы.
7. Вывести расчётные формулы для импульса и кинетической энергии при упругом и неупругом соударении шаров.
8. Какие превращения механической энергии совершаются в данной работе?

**Приложение**

**Импульс. Изменение импульса системы. Закон сохранения импульса.**

В физике главную роль играют такие величины, как импульс, механическая энергия тел. Известно, что эти величины при определенных условиях не изменяются со временем. Эти условия формулируют в виде законов сохранения импульса и механической энергии. Введем понятие импульса материальной точки. Пусть материальная точка массой  имеет в некоторый момент времени скорость , тогда *импульсом точки называется величина, равная произведению массы этой точки на вектор ее скорости:*

. (П.1)

Введем понятие импульса системы материальных точек. Пусть дана система, состоящая из  материальных точек, массы которых соответственно равны . Обозначим векторы скоростей этих точек через . *Импульс системы материальных точек равен сумме импульсов каждой материальной точки*, т.е.:

. (П.2)

Используя данное определение, можно показать, что импульс системы материальных точек равен произведению массы всех материальных точек на скорость их центра масс, т.е.:

, (П.3)

где  массы системы материальных точек.

Соотношение (П.2) позволяет выразить импульс твердого тела через массу тела и скорость его центра масс. Для этого тело разбивают на  бесконечно малых частей. Импульс твердого тела будет равен сумме импульсов каждой части. В результате можно получить следующее выражение для импульса твердого тела:

. (П.4)

Выясним, при каких условиях сохраняется импульс системы материальных точек. Пусть две материальные точки массами  и  взаимодействуют между собой с силами  и , где  вектор силы, с которой вторая точка действует на первую;  соответствующая величина для второй точки. Обозначим сумму всех внешних сил, действующих на первую точку через , а сумму всех внешних сил, действующих на вторую точку, — через . Запишем закон изменения импульса для первой и второй точки:

;

,

где  изменение импульса первой и второй точки соответственно;  начальный импульс первой и второй точки, а  импульс первой и второй точки через промежуток времени . Сложив предыдущие равенства, получим выражение

.

Проведя несложные преобразования, получим соотношение

.

Из третьего закона Ньютона вытекает, что сумма внутренних сил ,  равна нулю. Положив в последнем соотношении , получим

,

где  начальный импульс системы;  конечный импульс системы, а  вектор изменения импульса системы. Таким образом, мы получили следующее утверждение: *изменение импульса системы материальных точек равно произведению суммы* ***всех внешних сил****, действующих на систему на время действия этих сил*, т.е.:

. (П.5)

*Равенство (П.5) представляет собой закон изменения импульса механической системы*. Из данных рассуждений следует, что внутренние силы, с которыми отдельные части системы взаимодействуют между собой, могут изменить только импульс тех частей, к которым эти силы приложены. Однако внутренние силы не могут изменить полный импульс системы. Полный импульс системы изменяется только в результате действия внешних сил. Соотношение (5) позволяет сформулировать условия, при которых сохраняется импульс системы. Очевидно, что изменение импульса  равно нулю в том случае, если векторная сумма всех внешних сил равна нулю () или время изменения импульса является достаточно малой величиной (). *В том случае, если сумма всех внешних сил равна нулю, система называется замкнутой.* Таким образом, мы пришли к выводу: *импульс замкнутой системы не изменяется со временем.* Это утверждение получило название *закона сохранения импульса*.

Сформулируем важное следствие, вытекающее из соотношения (5). Рассмотрим незамкнутую механическую систему, для которой направление вектора суммы всех внешних сил  не изменяется в течение промежутка времени . В этом случае проекция вектора изменения импульса механической системы на ось ОХ, направленную перпендикулярно вектору , равна нулю, так как равна нулю проекция на эту ось вектора суммы всех внешних сил, т.е.:

.

Последнее равенство гласит, что для механической системы, в которой направление вектора суммы всех внешних сил  остается постоянным в течение времени , сумма проекций импульсов тел механической системы на ось, перпендикулярную вектору , не изменяется в течение .

**Изменение полной механической энергии. Закон сохранения механической энергии**

Способность тела совершать работу оценивается его полной механической энергией. *Полная механическая энергия  равна сумме кинетической и потенциальной энергии тела или материальной точки*, т.е.:

. (П.6)

Установим факторы изменяющие механическою энергию. Для простоты рассуждений рассмотрим материальную точку, на которую действуют силы . Работа этих сил на некотором участке траектории равна изменению кинетической энергии материальной точки:

,

где  величина работы силы ;  величина работы силы ;  величина работы силы .

Предположим, что среди множества рассматриваемых сил  имеются консервативные силы. Допустим, что консервативными являются силы  и , а остальные  — неконсервативные. Работу консервативных сил выразим через изменение потенциальной энергии материальной точки

.

С учетом записанного соотношения предыдущее равенство примет вид:

.

Перенесем изменение потенциальной энергии  в левую часть равенства:

.

Выразим изменение кинетической и потенциальной энергий через начальные и конечные значения:

,

где  соответственно конечное и начальное значение кинетической энергии материальной точки;  соответствующие величины для потенциальной энергии материальной точки. Подставив правые части полученных соотношений вместо  и  в предыдущее равенство, будем иметь следующее соотношение:

.

Последнее равенство преобразуем к следующему виду:

,

где  конечное, а  начальное значение полной механической энергии материальной точки;  сумма работ всех неконсервативных сил, действующих на материальную точку. Таким образом, мы установили, что *изменение полной механической энергии материальной точки равно сумме работ всех неконсервативных сил действующих на эту точку,* т.е.:

, (П.7)

где  изменение механической энергии;  сумма работ неконсервативных сил. **Это утверждение называется теоремой об изменении механической энергии материальной точки.** Из полученного соотношения следует, что механическая энергия материальной точки не изменяется с течением времени, если сумма работ неконсервативных сил  равна нулю. Условие  выполняется в следующих случаях:

1. На материальную точку действуют только консервативные силы.
2. На материальную точку действуют и консервативные и неконсервативные силы, однако сумма работ неконсервативных сил равна нулю.

Аналогичное утверждение можно получить для системы, состоящей из  материальных точек. Для этого достаточно записать соотношение (3.26) для каждой материальной точки, а затем, сложив полученные равенства, получим соотношение для изменения механической энергии системы:

, (П.8)

где  изменение механической энергии системы;  сумма работ неконсервативных сил, действующих на систему. Таким образом, для системы материальных точек справедливо утверждение: *изменение механической энергии системы равно алгебраической сумме работ неконсервативных сил.* Заметим, что вклад в выражение  дают как внешние, так и внутренние неконсервативные силы, действующие на рассматриваемую систему материальных точек. *Полная механическая энергия системы материальных точек не изменяется в том случае, когда в ней действуют только консервативные силы. Полная механическая энергия может сохраняться в присутствии неконсервативных сил в том случае, если алгебраическая сумма работ этих сил равна нулю*